

WCDMA 시스템에서 반복 다중사용자 검출기 및 터보 복호기의 성능

(Performance of Iterative Multiuser Detector and
Turbo Decoder in WCDMA System)

김 정 구*
(Jeong-Goo Kim)

요 약 본 논문에서는 WCDMA 시스템에서 고품질의 멀티미디어 서비스를 제공하기 위한 반복 다중 사용자 검출기 및 터보 복호기의 성능을 분석하였다. 특히 터보 복호기 자체의 지역반복 뿐만 아니라 터보 복호기를 포함하는 다중사용자 검출기의 전역반복도 고려하여 성능을 분석하였다. 시스템의 복잡도를 고려하였을 때, 적절한 오류성능을 보장하기 위해서는 지역반복과 전역반복의 반복횟수는 모두 3회가 가장 적절한 것으로 사료된다. 그리고 모의실험 결과 사용자의 수가 많아질수록 전역반복에 의한 간섭제거 능력이 커짐을 알 수 있었다.

핵심주제어 : WCDMA, Multi User Detection(MUD), 터보 부호

Abstract The performance of iterative multiuser detector and turbo decoder is presented to provide high quality multimedia services in WCDMA (wideband code division multiple access) system in this paper. Especially the relationship between the local iteration of turbo decoder and the global iteration of multiuser detector including the turbo decoder is analyzed. As a result, three local iterations and three global iterations are considered to be sufficient to provide satisfactory error performance with reasonable complexity. The interference cancellation capability of global iteration is improved when the number of users is increased.

Key Words : WCDMA, Multi User Detection(MUD), Turbo Code

1. 서 론

다중사용자 검출기법[1,2]은 다수의 사용자가 존재하는 이동통신 시스템에서 여러 열화요인을 극복하고 원하는 사용자의 신호를 검출하여 시스템의 성능을 향상하기 위한 수신기법이다. 이런 다중사용자 검출기법에는 최적 성능을 얻을 수 있는 최대가능성 열검출기 (maximum likelihood sequence

detector) [1] 그리고 최소평균제곱오류(MMSE; minimum mean square error) 다중사용자 검출기 및 병렬간섭제거기 (PIC; parallel interference cancellator)등과 같은 준최적 검출기가 있다[2].

미래의 이동통신 시스템은 현재의 음성 위주의 서비스에서 진일보하여 데이터, 동영상 등 다양한 서비스를 요구하고 있다[3]. WCDMA 시스템은 이런 고속 이동성을 지원하고 통신 품질 또한 높으며 대역 확산 방식을 사용하여 많은 양의 데이터 전송에 적합하다. 이런 WCDMA 시스템을 위해서는 다

* 부산대학교 정보컴퓨터공학부

중사용자 검출기뿐만 아니라 강력한 오류정정능력을 가진 오류정정부호의 사용이 필수적이다. 이런 오류정정부호 중 일반적으로 터보부호가 가장 우수한 성능을 가지는 것으로 알려져 있다[4].

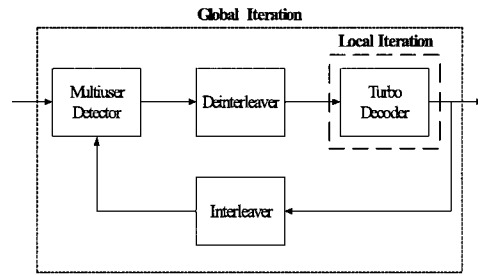
이런 다중사용자 검출기와 터보 복호기는 모두 반복검출 및 복호에 의한 성능향상이 가능하다 [5-7]. 따라서 이 두 가지 형태의 반복을 모두 고려한 연구가 필요할 것으로 사료된다. 그러나 기존의 분석들[5-6]은 터보 복호기의 자체의 반복복호는 고정된 채 다중사용자 검출기의 전체적인 반복검출에만 초점을 두어 간섭의 제거 여부를 연구 및 분석하였다. 그러므로 본 논문에서는 우선 WCDMA 시스템에 적합하도록 다중사용자 검출기와 터보 복호기를 연결한 시스템을 제시하고 이 구조를 토대로 터보 복호기를 포함한 다중사용자 검출기의 전체적인 반복검출 뿐만 아니라 터보 복호기 자체의 반복복호도 고려하여 반복 다중사용자 검출기 및 복호기의 성능을 분석한다. 또한 이런 분석을 바탕으로 WCDMA 시스템에 적합한 다중사용자 검출 및 터보복호의 반복 횟수를 제시한다.

2. 반복 다중사용자 검출기 및 복호기

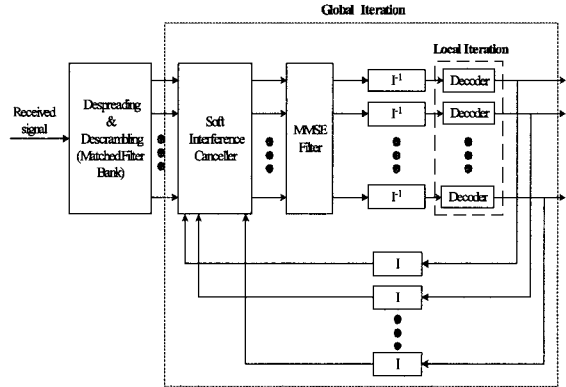
수신단에서 수행되는 반복복호의 개념을 그림 1의 (a)에, 그에 해당하는 수신기를 (b)에 나타내었다. 여기서 I는 인터리버 (interleaver)를 I^{-1} 은 역인터리버 (deinterleaver)를 각각 나타낸다. 그림 1의 (a)에 나타난 바와 같이 반복 다중사용자 수신기의 구조는 크게 다중사용자 검출기와 터보 복호기가 인터리버와 역인터리버를 사이에 두고 나누어진 형태를 보인다. 본 논문에서는 그림 1에 나타난 바와 같이 터보부호에 대한 반복복호과정을 지역반복 (local iteration), 그리고 터보부호를 포함하는 다중사용자검출 반복복호 과정을 전역반복 (global iteration)으로 명명한다.

다중사용자 검출시 최적의 방법인 최대가능성 열검출기법[1]을 사용한다면 복잡도는 사용자의 수에 따라 지수적으로 증가한다. 이는 사용자가 많은 채널에서 구현상의 제한적 요소가 된다. 따라서 본 논문에서는 MMSE 다중사용자 검출기법[5]에 기초를 둔 상대적으로 낮은 복잡도의 SISO (soft input soft output) 다중사용자 검출기를 사용하여 성능을

분석한다. 정합필터를 통과한 각 사용자의 신호는 다중접속 간섭 성분을 제거하고 채널에 의한 신호의 오류를 정정하기 위해 다중사용자 검출기 및 터보 복호기에 순차적으로 입력된다. 본 논문에서 사용된 다중사용자 검출과정은 두 부분으로 나누어진다. 이는 각각 그림 1의 (b)에 나타낸 간섭제거기와 그 출력값에 남아있는 잔여간섭성분을 줄이기 위한 MMSE 필터이다[5]. 터보 복호기는 두 개의 구성 복호기가 인터리버와 역인터리버를 사이에 두고 부가 정보 (extrinsic information)를 서로 교환하는 반복복호 즉, 지역반복을 수행한다.



(a)



(b)

<그림 1> 반복복호 다중사용자 검출기 및 터보 복호기 (a) 반복 복호개념 (b) 수신기

지역반복이 완료되면 그 출력값이 SISO 다중사용자 검출기의 사전정보로 이용된다. 이로써 한번의 전역반복이 완료된다. 전역반복의 횟수가 증가하면 메모리에 저장된 각 사용자의 신호와 터보 복호기의 출력값을 이용하여 다시 간섭제거기와 터보 복

호기를 거친다. 마지막으로 모든 반복이 끝나게 되면 터보복호기의 출력값을 경판정하여 사용자의 신호를 결정한다.

그리고 일반적인 터보 복호기와 마찬가지로 다중 사용자 검출기에서도 반복복호를 일정횟수 이상으로 증가해도 성능의 향상이 크게 일어나지 않을 것으로 예상된다. 따라서 적절한 오류 성능의 범위 내에서 복잡도를 고려하여 전역반복 및 지역반복의 적절한 횟수를 선택하는 것이 필요할 것으로 사료된다.

3. 모의실험 결과 및 분석

제시된 시스템의 성능을 분석하기 위하여 모의실험을 AWGN (additive white Gaussian noise)과 레일리 페이딩 (Rayleigh fading) 채널에서 수행하였다. 전체 사용자의 수는 일반적으로 성능 분석시 많이 사용되는 5명과 10명인 두 경우로 나누었다. 일반적으로 WCDMA 시스템에 사용되는 터보부호의 부호율은 재전송의 여부에 따라 1/3에서 1/5사이에서 가변적으로 사용된다. 따라서 본 논문에서는 첫 번째 전송시 사용되는 부호율인 1/3을 사용하였다. 그리고 입력 프레임 길이는 반복에 의한 성능의 변화를 쉽게 관찰하기 위해 1024비트로 하였다. 변조방식은 BPSK (binary phase shift keying)를, 그리고 레일리 페이딩 채널에서는 완벽한 채널추정을 가정하였다. 터보복호 알고리즘으로는 최적의 성능을 나타내는 방식으로 알려진 MAP (maximum a posteriori) 알고리즘을 사용하였다. 따라서 본 논문에서 사용된 연판정 (soft decision) 길이는 입력 프레임 길이인 1024로 정하였다.

3.1 AWGN 채널에서의 오류성능

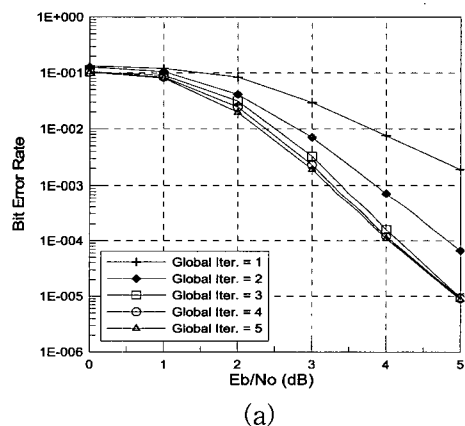
우선 사용자가 5명일 때 전역반복 및 지역반복을 각각 1회에서 5회, 1회에서 4회로 가변 하면서 모의실험을 수행한 결과를 그림 2에 나타내었다. 모의실험 결과 지역반복의 횟수가 증가할수록 반복에 의한 성능이 점차적으로 향상됨을 볼 수 있다. 예를 들어 그림 2의 (a)에서 (d)까지를 보면 전역반복의 횟수가 3회일 때 10^{-5} 의 비트 오류율을 얻기 위해서는 1회에서 4회까지 각 지역반복 횟수에 따라

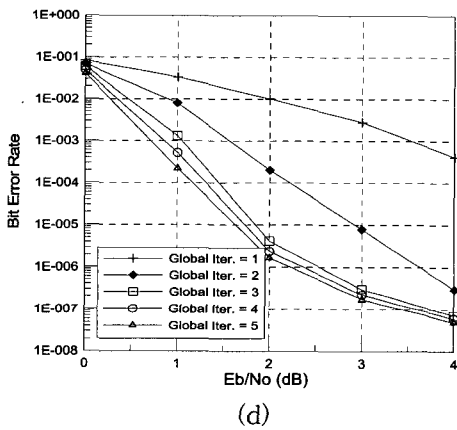
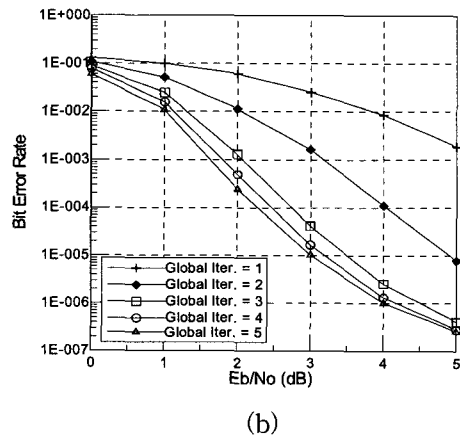
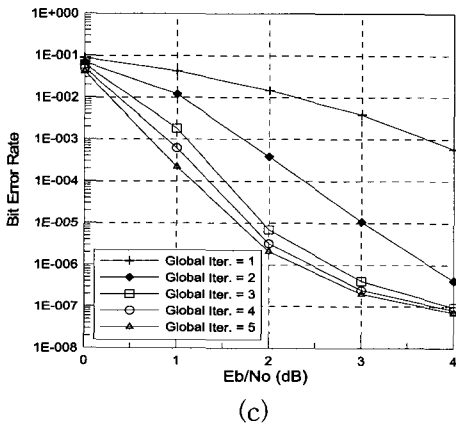
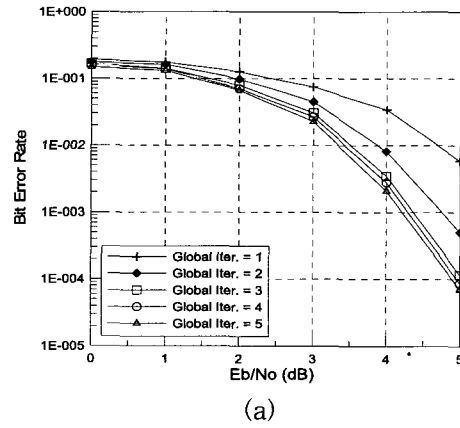
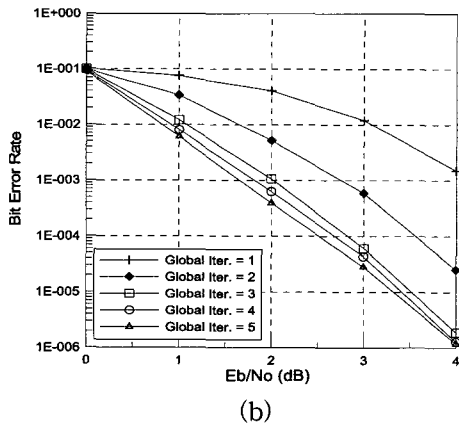
약 5, 3.5, 1.9, 1.8dB의 신호대 잡음비가 필요하다.

하지만 지역반복의 횟수를 3번 수행한 그림 2의 (c)와 4번 수행한 (d)를 보면 상대적으로 미미한 성능차이를 보인다. 예를 들어 3번의 전역반복을 하는 경우 지역반복이 3회와 4회일 때 10^{-7} 의 비트 오류율을 얻기 위해 요구되는 신호 대 잡음비는 각각 약 4dB와 3.8dB로 거의 차이가 없음을 볼 수 있다. 그리고 그림 2의 모든 경우에 나타나듯이 전역반복 횟수가 3회 이상인 경우 역시 뚜렷한 성능 향상이 나타나지 않는다. 위의 경우를 모두 고려하면 지역반복의 및 전역반복 모두 3회 이상일 경우 성능의 포화가 일어남을 알 수 있다.

다음은 간섭요인이 증가한 경우 즉, 사용자가 5명에서 10명으로 증가한 경우 전역반복을 1회에서 5회로 가변시키고, 지역반복을 1회와 3회로 두고 모의실험을 수행한 결과를 각각 그림 3에 나타내었다.

동일한 반복횟수에 따른 성능을 비교하기 위해 지역반복이 1회인 그림 2의 (a)와 그림 3의 (a), 그리고 지역반복이 3회인 그림 2의 (c)와 그림 3의 (b)를 각각 비교해 보면 사용자가 5명에서 10명으로 증가한 경우 약간의 성능저하는 있으나 성능의 변화 추이는 거의 비슷함을 볼 수 있다. 예를 들어 각 지역반복의 횟수에 따라 전역반복을 3회 이상 수행한 경우 동일한 성능포화 현상의 추세를 보인다. 따라서 사용자 5명, 그리고 10명일 때의 두 실험 결과로부터 오류성능을 고려한 최적반복 횟수는 지역반복과 전역반복이 모두 3회인 것으로 사료된다.





<그림 2> AWGN 채널에서 사용자 5명일 때 BER 성능
 (a) 지역반복 1회 (b) 지역반복 2회
 (c) 지역반복 3회 (d) 지역반복 4회

<그림 3> AWGN 채널에서 사용자 10명일 때 전역반복과 지역반복을 복합적으로 수행했을 때의 BER 성능

(a) 지역반복 1회 (b) 지역반복 3회

지역반복의 횟수를 3회로 고정한 경우 전역반복에 따른 성능의 변화를 표 1에 나타내었다. 표 1을 보면 사용자가 5명인 경우에 비하여 10명인 경우 전역반복횟수가 증가함에 따라 필요한 E_b/N_0 의 상대적 차이가 커짐을 볼 수 있다. 즉 간섭제거의 효과가 상대적으로 커짐을 알 수 있다.

<표 1> 지역반복이 3회일 때 전역반복횟수에 따른 성능

BER	5 users			10 users		
	Number of global iterations		Diff.	Number of global iterations		Diff.
	2	3		2	3	
10^{-4}	2.4	1.5	0.9	4.0	2.8	1.2
10^{-5}	3.0	1.9	1.1	4.9	3.5	1.4
10^{-6}	3.7	2.6	1.1	-	-	-

3.2 레일리 페이딩 채널에서의 오류성능

레일리 페이딩 채널에서 반복 다중사용자 검출기 및 터보 복호기의 성능을 구하기 위하여 다음과 같은 환경에서 모의실험을 하였다. 사용자는 5명으로 하였고, WCDMA 시스템의 표준에 따라서 반송파 주파수는 2.0GHz와 전송율은 144kbps[3]로 하였다. 그리고 이동국의 속도는 60km/h로 하였다. 레일리 페이딩 채널에서 발생하는 오류는 AWGN 채널에서 발생하는 산발 오류와는 달리 연접화되는 경향이 있다. 이런 연접오류는 시스템 전체의 성능을 저하시키므로 연접오류를 적절히 산발화 시켜주기 위하여 채널 인터리버가 사용되어야 한다. 모의실험 결과 채널 인터리버의 크기는 입력 프레임 길이의 약 30배 정도면 충분히 연접오류를 산발화 시켜주는 것으로 나타났다. 따라서 본 논문의 모의실험에서는 입력 프레임 길이 1024비트의 약 30배인 스펠이 200이고 깊이가 150인 블록 인터리버를 사용하였다.

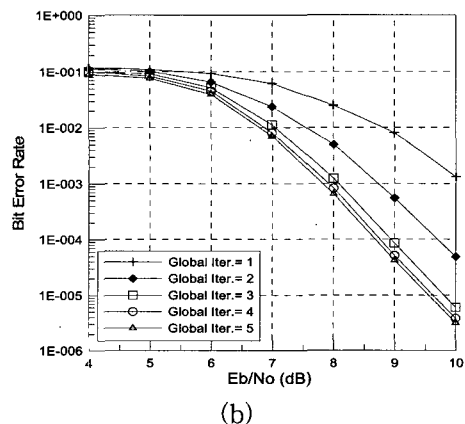
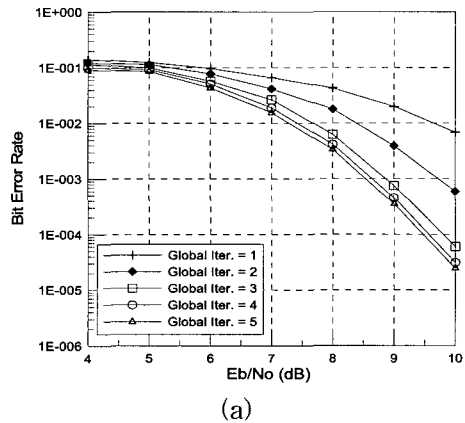
사용자가 5명일 때 레일리 페이딩 환경에서 반복 다중사용자 검출기 및 터보 복호기의 성능은 그림 4와 같다. AWGN 채널에서와 같이 전역반복 및 지역반복의 횟수는 각각 1회에서 5회, 1회에서 4회로 가변시켜 모의실험을 수행하였다. AWGN 채널에서와 같이 지역반복의 횟수가 증가할수록 반복에 의한 성능이 향상된다. 예를 들어 그림 4의 (a)에서 (d)까지를 보면 전역반복의 횟수가 3회일 때 10^{-5} 의 비트 오류율을 얻기 위해서는 각 지역반복 횟수에 따라 약 10.5, 9.9, 8.8, 8.6dB의 신호 대 잡음비가 필요함을 볼 수 있다.

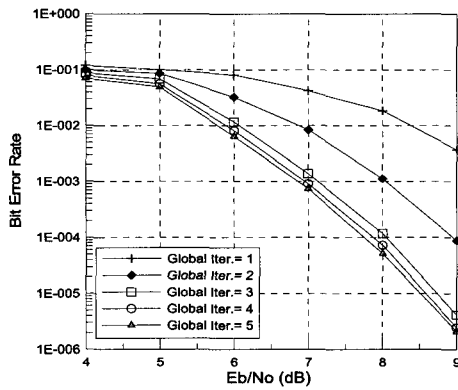
하지만 AWGN 채널의 모의실험 결과와 마찬가지로

지역반복의 횟수를 3번 수행한 그림 4의 (c)와 4번 수행한 (d)를 보면 그 성능 차이가 상대적으로 미미하다. 그리고 그림 4의 모든 경우에 나타나듯이 전역반복 횟수가 3회 이상인 경우 1회에서 3회까지와는 달리 뚜렷한 성능 향상이 나타나지 않는다. 따라서 레일리 페이딩 환경에서도 지역반복의 횟수는 3회 이상이고 전역반복의 횟수가 3회 이상일 경우 반복에 의한 성능이 포화가 일어남을 알 수 있다. 그러므로 이 경우 역시 오류성능을 고려한 최적반복 횟수의 관점에서 본다면 지역반복 및 전역반복 모두 3회가 적합할 것으로 사료된다.

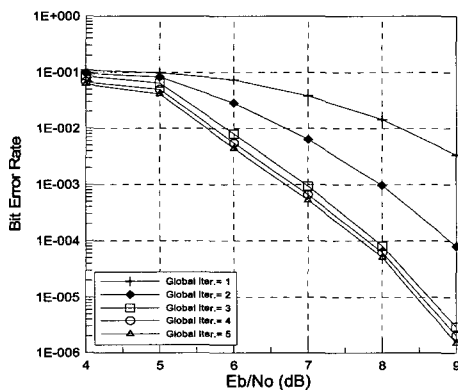
3.3 복잡도

실제 이동통신 환경에서는 반복에 의한 전체 시스템의 복잡도가 통신의 제한요소이므로 반복에 따른 복잡도를 고려하며 성능의 분석이 이루어져야 한다. 각 사용자에게 대한 계산 복잡도는 O-표기법 (big-Oh notation)[5]을 사용하여 나타내는데 이 표기법은 시간





(c)



(d)

<그림 4> 레일리 페이딩 채널에서 사용자 5명일 때 BER 성능.

- (a) 지역반복 1회, (b) 지역반복 2회,
- (c) 지역반복 3회, (d) 지역반복 4회.

<표 2> 사용자 5명일 때 반복 다중사용자 검출기 및 터보 복호기의 복잡도

		Number of local iterations		
		1	2	3
Number of global iterations	1	$O(5^2+2^4)$	$O(5^2+2 \times 2^4)$	$O(5^2+3 \times 2^4)$
	2	$O(2 \times 5^2+2^4)$	$O(2 \times 5^2+2 \times 2^4)$	$O(2 \times 5^2+3 \times 2^4)$
	3	$O(3 \times 5^2+2^4)$	$O(3 \times 5^2+2 \times 2^4)$	$O(3 \times 5^2+3 \times 2^4)$
	4	$O(4 \times 5^2+2^4)$	$O(4 \times 5^2+2 \times 2^4)$	$O(4 \times 5^2+3 \times 2^4)$

복잡도 (time complexity)를 나타낸다. 전체 복잡도는 다중접속간섭 제거에 사용되는 뿔셈 연산과

MMSE 필터에 사용되는 상관행렬의 곱셈 연산 ($K \times K$) 및 이를 부가 정보로 변환 시 수행되는 곱셈연산 ($K \times K$)에 의해 결정된다[5]. 여기서 K 는 사용자의 수를 나타낸다. 곱셈연산이 전체 계산량의 대부분을 차지함을 볼 수 있다. 따라서 사용자에 대한 SISQ 다중사용자 검출기의 복잡도는 $O(K^2)$ 로 나타내어지고 이는 실행시간이 사용자 수의 제곱에 비례한다는 의미이다. 그리고 터보 복호기의 계산 복잡도는 $O(2^v)$ 이므로[4], 한 명의 사용자에 대한 반복 다중사용자 검출기 및 터보 복호기의 복잡도는 $O(K^2 \times G + 2^v \times L)$ 가 된다. 여기서 v 는 터보 부호기의 구속 길이 (constraint length)이고, G 와 L 은 각각 전역반복과 지역반복의 횟수이다. 따라서 지역반복이 고정된 상태에서 전역반복의 횟수가 증가한다면 한 사용자에 대하여 $K^2 + 2^v \times L$ 만큼의 복잡도가 증가하게 될 것이며 전역반복이 고정된 상태에서 지역반복의 횟수가 증가된다면 $K^2 \times G + 2^v$ 만큼의 복잡도가 증가한다.

사용자가 5명일 때 반복횟수에 따른 복잡도를 표 2에 나타내었다. 지역반복이 3회를 초과하면 성능의 향상이 없으므로 그 이상에 대한 복잡도는 나타내지 않았다. 표 2를 보면 전역반복과 지역반복의 횟수가 각 1회인 경우에 비하여 전역반복이 1회이고 지역반복이 3회인 경우 복잡도가 약 1.6배 증가하였고, 전역반복이 3회이고 지역반복이 1회인 경우에는 복잡도가 약 2.2배 증가하였다. 따라서 전역반복의 횟수 증가에 의한 복잡도가 지역반복의 횟수 증가에 의한 복잡도 증가보다 더 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 사용자가 증가하면 상관행렬의 크기가 커지므로 전역반복에 의한 복잡도는 더욱 증가하고, 지역반복에 의한 복잡도는 크게 증가하지 않는 것으로 사료된다.

4. 결론

미래의 이동통신 시스템에서는 현재의 음성 위주의 서비스에서 진일보하여 데이터, 동영상 등 다양한 멀티미디어 서비스가 요구되고 있다. 3세대 이동통신 시스템의 표준 중 하나인 WCDMA 시스템은 이런 고속 이동성을 지원하고 통신 품질 또한 높으며 대역 확산 방식을 사용하여 많은 양의 데이터 전송에 적합하기 때문에 이런 조건에 부합한다.

이런 WCDMA 시스템에서 요구되는 고속 및 대용량의 멀티미디어 서비스를 위한 고품질의 통신을 제공하기 위해서는 다중사용자 검출기 및 강력한 오류정정능력을 가진 터보부호의 사용이 바람직하다.

본 논문에서는 전역반복과 지역반복을 동시에 행하는 WCDMA 시스템에서 MMSE 필터를 사용한 반복 다중사용자 검출기 및 터보 복호기의 반복횟수에 따른 성능을 AWGN과 레일리 페이딩 채널에서 분석하였다. 모의실험결과 지역반복과 전역반복이 각각 3회 이상이 되면 성능이 포화되어 더 이상의 성능향상이 미미함을 보았다. 따라서 최적반복횟수의 관점에서 보면 AWGN 및 레일리 페이딩 채널 모두 지역반복 및 전역반복 횟수가 모두 3회가 가장 적합한 것으로 사료된다. 그리고 간섭요인이 증가할수록 전역반복에 의한 간섭제거의 효과가 상대적으로 커짐을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] S. Verdu, *Multiuser Detection*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, England, 1998.

[2] S. Moshavi, "Multi-user detection for DS-SS-CDMA communications," *IEEE Commun. Magazine*, vol. 34, no. 10, pp. 124-136, Oct. 1996.

[3] H. Holma and T. Antti, *WCDMA for UMTS: Radio Access For Third Generation Mobile Communications*, John Wiley & Sons, England, 2000.

[4] C. Berrou and A. Glavieux, "Near optimum error correcting coding and decoding: Turbo-codes," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 44, no. 10, pp. 1261-1271, Oct. 1996.

[5] X. Wang and V. Poor, "Iterative(Turbo) Soft Interference Cancellation and Decoding for Coded CDMA," *IEEE Trans. Commun.* vol. 47, no. 7, pp. 1046-1061, July 1999.

[6] X. Wang and V. Poor, "Turbo multiuser detection for turbo-coded CDMA," *Proc. IEEE WCNC'99*, New Orleans, LA, vol. 3, pp. 1456-1460, Sep. 1999.

[7] A. Ambroze, G. Wade, and M. Tomlinson,

"Iterative MAP decoding for serial concatenated convolutional codes," *Proc. IEE Commun.*, vol. 145, no. 2, pp. 53-59, Apr. 1998.

[8] 3G TS 25.213, v5.0.0: "Spreading and modulation (FDD)"



김 정 구 (Jeong-Goo Kim)

- 종신회원
- 1988년: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
- 1991년: 경북대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
- 1995년: 경북대학교 대학원 전자공학과(공학박사)
- 1995년 ~ 2005년: 밀양대학교 정보통신공학과 부교수
- 1999년 ~ 2001년: UCSD 교환교수
- 2006년 ~ 현 재 : 부산대학교 정보컴퓨터공학부 부교수
- 관심분야 : 부호이론, 통신시스템, 방송전송기술